

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.063

基于实测载荷的蔬菜田间动力机械车架结构优化

谢斌 温昌凯 杨子涵 鹿铁彪 宋正河

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 蔬菜田间动力机械作为一种新型机器,可以实现不同的收获前机械化作业,车架在田间作业时受到各种载荷作用,会伴随有动载荷影响,有必要对车架进行强度研究与优化设计。研究了其车架基于田间实测应变数据的多目标拓扑优化设计方法。利用 HyperWorks 软件对该车架进行有限元分析,得到了静应力分析条件下的应力分布,并确定车架的疲劳损伤热点;在数据分析基础上,粘贴应变片,组建动态应变测试系统,采集蔬菜田间动力机械典型作业工况下的载荷时间历程;对实测的应变时间历程数据进行预处理,分析车架在相应工况下的受力情况;利用 nCode 软件编制载荷谱,进行车架的疲劳分析与寿命预测,以此为基础提出了拓扑优化,构建了综合多种工况、以车架应变能和动态低阶固有频率为响应的多目标拓扑优化数学模型,进行轻量化设计。试验结果表明,车架的交叉焊缝处的疲劳寿命为 7.5×10^4 h,为 15 个测点中最短疲劳寿命,满足使用寿命要求,车架整体结构强度设计过剩。优化后的车架质量减小 443.55 kg,减轻了 53.47%。

关键词: 蔬菜田间动力机械;车架;应变测试;多目标拓扑优化

中图分类号: TH114; S210.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)S0-0463-07

Structure Optimization of Frame for Field Vegetable Power Machinery Based on Measured Load Data

XIE Bin WEN Changkai YANG Zihan LU Tiebiao SONG Zhenghe

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: As a new type of machine, field vegetable power machinery can realize different pre-harvest mechanization operations. The frame is subjected to various loads during field operations, which is accompanied by dynamic load. It is necessary to carry out strength research and optimization design of the frame. The multi-objective topology optimization design method based on field measured strain data was studied. HyperWorks software was used to carry out finite element analysis of the frame, the stress distribution under static stress analysis conditions was obtained, and the fatigue damage hotspot of the frame was determined. On the basis of data analysis, the strain gauges were pasted, and the dynamic strain test system was set up to collect the load time history under typical working conditions of field vegetable power machinery. The measured strain time history data was preprocessed, and the force of the frame under the corresponding working conditions was analyzed. The load spectrum was compiled by nCode software, and the fatigue analysis and life prediction of the frame were performed. Based on the analysis and life prediction, the topology optimization was proposed, and a multi-objective topology optimization mathematical model with multiple frame conditions and dynamic low-order natural frequency response was constructed to carry out lightweight design. The test results showed that the fatigue life at the cross weld of the frame was 7.5×10^4 h, the fatigue life was the shortest among the 15 points, which met the service life requirement, and the overall structural strength of the frame was over-designed. The optimized frame quality was reduced by 443.55 kg, which was reduced by 53.47%.

Key words: field vegetable power machinery; frame; stress-strain test; multi-objective topology optimization

收稿日期: 2018-07-10 修回日期: 2018-08-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700301)

作者简介: 谢斌(1973—),男,副教授,主要从事农业装备智能化、电液控制和车辆电控研究,E-mail: xiebincau@126.com

0 引言

由于我国地域辽阔,蔬菜作物品种众多,不同地区作物差别较大,因此专业化蔬菜田间作业机械在进行田间作业时通用性较差^[1-2]。蔬菜田间作业动力机械通用平台正是基于挂载不同机具的通用性这一目标而研发的。其设计主要用于蔬菜收获前作业,包括:整地(犁耕、深耕、浅耕、作畦、起垄、覆膜)、播种(撒播、条播、穴播、精密播种)、田间管理(施肥、喷药、中耕除草)等^[3]。该动力机械为框架结构,在中间位置可以挂载不同的农机具以满足不同的收获前机械化作业要求。车架在田间作业时受到弯曲、扭转、弯扭等载荷作用,会有明显的动载荷影响。因此,有必要对车架进行结构强度与优化设计研究,保证机械的可靠性。

目前,国内有关农机装备的载荷谱疲劳分析方面的研究仍在起步阶段,朱金光等^[4]采用有限元对玉米收获机底盘车架的强度和刚度进行分析,根据有限元分析结果对结构进行优化,不仅改善了应力分布、加强了刚度,还减轻了结构质量。陈志等^[5]基于实测载荷谱,研究了玉米收获机底盘车架的疲劳寿命,并进行了结构优化。朱茂桃等^[6]提出了基于有限元的桥壳疲劳寿命预测方法,并模拟桥壳试验条件下的疲劳载荷,借助疲劳寿命分析软件估算出桥壳各部分的疲劳损伤情况。文献研究表明,计算机辅助工程(Computer aided engineering, CAE)技术对于机械行业的开发周期、开发成本以及提高产品质量都有很大的提升,但是由于结构简化和忽略引起很多难以预估的实际载荷的影响,导致某些预测的精度难以保证^[7]。将疲劳载荷谱技术与 CAE 技术相结合,以实测载荷谱为基础,能够大幅度提高预测精度。

本文以减轻结构质量、保证机器作业性能为目的,对自行研制的蔬菜田间动力机械车架的结构强度和优化设计展开研究。首先,对蔬菜田间动力机械车架进行典型工况下的有限元分析;其次,进行田间作业测试,获取车架在开沟预耕工况下的应变时间历程;然后,对数据进行预处理,编制载荷谱,进行疲劳寿命分析;最后,基于拓扑优化,对车架进行结构优化。

1 仿真分析

蔬菜田间动力机械试验样机长 3 200 mm、宽 2 000 mm、高 2 000 mm,整机主要由行走机构、转向机构、驱动机构、悬挂装置等组成,车架属于框架结构,采用 2 根贯穿前后的龙门式纵梁和 3 根横梁焊

接组成刚性车架骨干。发动机等动力部件安装在驾驶平台右侧,驾驶室及操纵机构安装在驾驶平台左侧,液压马达安装在驱动轮上,液压油路及控制电路依附于车架布置,整机布置方案如图 1 所示。试制样机的主要参数如表 1 所示。

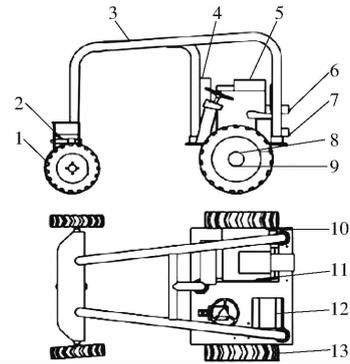


图 1 整机布置方案

Fig. 1 Layout plan of field vegetable machinery

1. 前轮 2. 转向桥 3. 机架 4. 散热器 5. 空气滤清器 6. 液压泵 7. 液压油箱散热器总成 8. 液压马达 9. 减速器 10. 发动机油箱 11. 发动机 12. 驾驶室 13. 后轮

表 1 整机主要参数

Tab. 1 Main parameters

参数	数值/型号
整机外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	3 200×2 000×2 000
轴距/mm	2 100
轮距/mm	前轮 1 590~1 790;后轮 1 790
最小离地间隙/mm	330
最大爬坡度/(°)	11(20%)
整机空载质量/kg	1 800
整机满载质量/kg	2 700
最高车速/(km·h ⁻¹)	20
最小转弯半径/m	4.22
动力源	ZN390B 型柴油机
输出功率/kW	28.5
转速/(r·min ⁻¹)	2 600
轮胎	前轮人字轮胎 6~16; 后轮人字轮胎 8.3~24

1.1 有限元模型建立

采用 HyperWorks 软件对车架进行分析^[8]。在划分网格前对模型进行预处理。随后采用 HyperMesh 对车架进行网格划分。车架及支撑架主要由 Q235 钢材焊接而成,车架主要由钢管焊接而成,支撑架主要由钢板以及槽钢焊接而成。对该车架使用壳单元进行网格划分,以 2D 壳单元网格选择 quad 网格类型对中性面进行划分,设置网格单元最小尺寸为 10 mm,在定义材料属性时输入板厚等参数。利用 Rbe2 单元模拟点焊,连接两个结构对应节点,从而连接两个分离的结构,模拟结构间焊

缝^[9]。划分完成后,车架中有限元单元数目为116 550个,节点数目为117 050个,网格单元最小雅可比为0.6。

1.2 静力学分析

蔬菜田间作业动力机械作业时车架所承受的载荷主要包括发动机总成质量、液压元件质量、液压油箱、车架自重及作业时所受外载荷^[10]。作业时所受动载荷较大,选取动载系数为2.5^[11]。根据实际情况以及静力等效原则完成简化加载后,采用HyperWorks的静力学分析模块分析车架的受力情况,得到应力分布如图2所示。由图2可知,在静载荷作用下,交叉梁焊缝处、左右纵梁中部、支撑架上发动机装载位置及液压油箱总成部位应力比其他部位大。在车架同时受弯曲和扭转时,车架上3根横梁抵抗车架扭转变形,因此在纵梁上3根横梁与梁连接位置附近会出现应力集中现象。应力集中区域最容易产生疲劳裂纹,对构件的疲劳寿命影响很大,需着重研究其疲劳损伤情况。

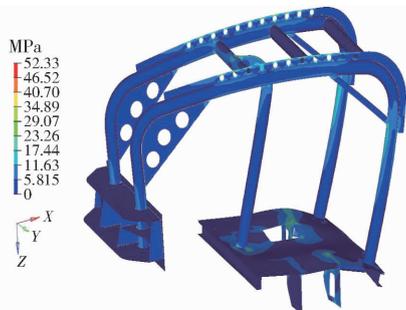


图2 车架静力学分析

Fig.2 Static analysis of frame

在静力学分析中,最大应力为52.33 MPa,大部分区域应力不超过20 MPa,远低于许用应力,说明该部件在设计时存在较大的强度过剩,可以通过相应的疲劳寿命研究以及拓扑优化设计予以轻量化设计。考虑到静力分析结果、反馈信息以及粘贴方便,选择应力较大的15个点布置应变片,如图3所示。

2 试验与分析

2.1 动态应力测试系统组成

为获取田间实测应变数据以对车架进行多目标拓扑优化设计,搭建了样机动态应力测试系统,进行田间作业应变测试^[12]。测试系统主要包括传感器、数据采集模块、数据采集软件,其原理示意图如图4所示。信号采集仪采用北京一洋应振测试公司的YSV8016,采用YSV工程测试与信号分析软件。其中有9个点使用BX120-3AA型单轴向应变片测试,有6个测点使用BX120-2CA型应变花测试,部分粘贴效果如图5所示。

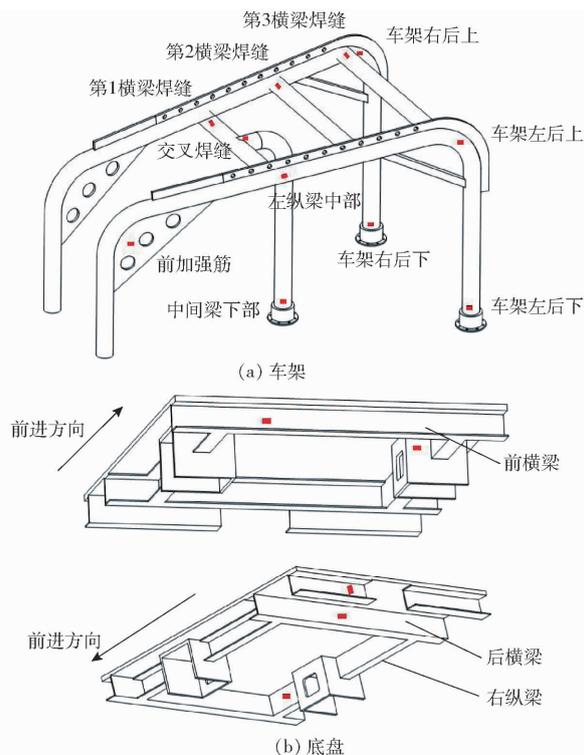


图3 车架及底盘测点图

Fig.3 Measuring points of frame and chassis

2.2 田间作业载荷数据采集

测试地点:北京郊区壤土地块;时间:2017年11月;温度:8℃。本次样机试验分为怠速工况、良好路面行驶工况、田间开沟作业工况与制动工况4种测试工况。测试作业类型:开沟,入土深度15 cm,单次作业开沟数量7垄,耕作速度2.5 km/h。

2.3 疲劳寿命预测计算

对于可判断主应力方向的测点,使用单轴向应变片测量即可。对于不能判断测点主应力大小和方向的测点,使用45°三轴向应变片,即应变花来测量。应变花与应变片测量原理相同,每一个应变花可视为由3个应变片组成,应变片方向呈0°、45°、90°共3个方向排列。通过应变片分别测取某测点3个方向的应变 ε_0 、 ε_{45} 、 ε_{90} ,可确定该点主应变 $(\varepsilon_{\max}, \varepsilon_{\min})$ 及主应变方向 α_0 ,计算式为

$$\begin{cases} \varepsilon_{\max} = \frac{1}{2} \{ (\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}) + \sqrt{2 [(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{90})^2]} \} \\ \varepsilon_{\min} = \frac{1}{2} \{ (\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}) - \sqrt{2 [(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{90})^2]} \} \\ \tan(2\alpha_0) = \frac{2\varepsilon_{45} - \varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}} \end{cases} \quad (1)$$

构件在形变初始阶段应力与应变呈正比,遵循胡克定律^[13]。实际应力为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (2)$$

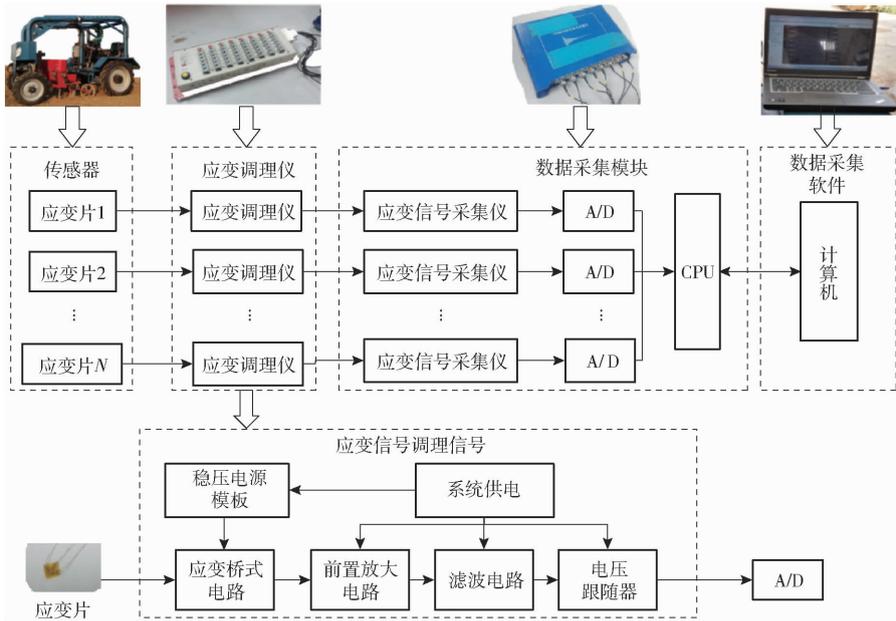


图4 动态应变测试采集系统

Fig. 4 Dynamic strain test acquisition system

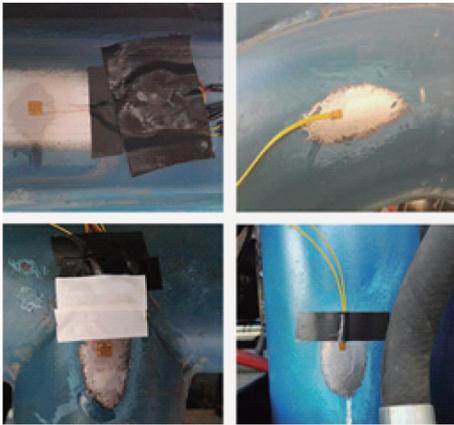


图5 应变片粘贴效果

Fig. 5 Effect of strain gauge paste

式中 σ ——应力, MPa ϵ ——应变
 E ——弹性模量, MPa

在数据分析中,首先对试验测区的应变信号进行处理,去除了信号中的毛刺、电子线路干扰等^[14]。处理后的部分信号如图6所示。

然后结合各个测点在4种工况下的最大主应力、等效应力等数据,分析车架与底盘在作业工况下的受力状况,检验车架与底盘是否存在强度不足或者强度过剩等问题。

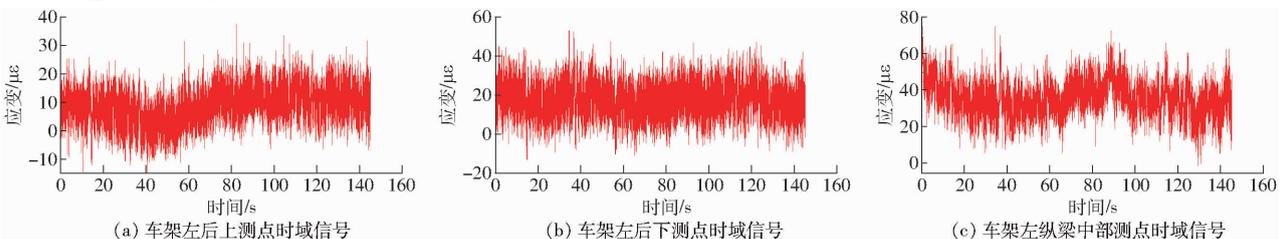


图6 部分测点应变时间历程

Fig. 6 Stress at different measuring points

车架各测点在所测4种工况下应力都远小于材料许用应力。车架整体刚度较大,各工况下应力水平偏低。应力较大点出现在底盘与车架交叉焊缝处,作业工况下最大应力为29.98 MPa,如表2所示。

底盘各测点在所测4种工况下应力远小于材料许用应力。底盘整体应力水平偏低,根据测试结果可判断车架安全裕量较大,如表3所示。

对采集的作业载荷进行预处理,消除了奇异点、趋势项以及噪声滤波^[15]。首先对应力数据进行正态分布检验以及频谱分析,随后采用雨流记数法进行载荷谱编制,并显示载荷累计频次分布。采用应力-寿命法,查询材料的S-N曲线。S-N曲线数据是在零平均应力水平下的,由于曲线数据的设计裕量大,故采用Goodman曲线进行疲劳强度检验,从而得到修正后各个平均应力水平下应力与寿命间的关系。Goodman公式为

$$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_M} = 1 \quad (3)$$

式中 S_e ——疲劳强度, MPa
 S_M ——拉伸极限强度, MPa

表 2 不同工况车架采集数据

Tab.2 Strain data of frame MPa

测点名称	怠速工况	良好路面	作业工况	制动工况
车架左后下	6.91	6.56	11.37	7.34
车架右后上	4.65	5.14	7.53	7.95
车架左后上	14.57	3.36	7.82	7.76
车架右后下	3.47	6.48	11.41	16.47
左纵梁中部	4.72	6.92	16.14	19.76
右纵梁中部	3.21	5.61	12.45	13.71
第1 横梁焊缝	2.78	4.10	10.90	8.19
第2 横梁焊缝	2.92	5.28	8.12	11.28
第3 横梁焊缝	3.86	6.96	6.94	10.30
交叉焊缝			29.98	20.77

表 3 底盘采集数据

Tab.3 Strain data of chassis MPa

测点	怠速工况	良好路面	作业工况	制动工况
前加强筋	3.593	5.342	10.002	
前横梁			21.927	27.598
马达壳体			15.118	20.581
右纵梁			4.882	17.480
后二横梁			10.357	18.626

S_m ——平均应力,MPa

S_a ——应力幅值,MPa

最后,根据应力-寿命法与 Miner 线性累积损伤法则,利用 nCode 依次分别对作业和制动工况下各测点进行疲劳分析,得到各测点疲劳寿命,如表 4 所示^[16]。

表 4 疲劳寿命

Tab.4 Fatigue life values h

测点	作业工况	制动工况
车架右后下	1.8×10^6	9.2×10^4
左纵梁中部	2.3×10^6	1.8×10^4
右纵梁中部	4.9×10^6	4.8×10^4
第1 横梁焊缝	1.9×10^5	1.1×10^6
交叉焊缝	7.5×10^4	1.8×10^6
前横梁	5.8×10^5	2.2×10^6
马达壳体	5.5×10^{10}	1.1×10^8

在作业工况下,寿命最短的测点在交叉焊缝处,该部位为连接车架和支撑架的结合点,是整机的危险点。通过计算,在正常作业工况下,该点疲劳寿命为 7.5×10^4 h,为所有测点中疲劳寿命最短的点。按每天作业 10 h,每年作业 100 d 计算,车架寿命大于 75 a,足以满足使用寿命要求。

2.4 车架结构优化

基于多目标拓扑优化基本理论,对蔬菜田间作业动力机械进行拓扑优化,使其同时满足不同作业工况下的刚度要求和低阶固有频率特性^[17-18]。以

体积分数作为约束条件,通过折衷规划法,得到多目标拓扑优化数学模型

$$\begin{cases} \mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T \in \mathbf{R}^n \\ \min F(\mathbf{X}) = \left[\omega^q \left(\sum_{k=1}^4 \alpha_k \frac{C_k(x_e) - C_{k,\min}}{C_{k,\max} - C_{k,\min}} \right)^q + (1 - \omega)^q \left(\frac{\Delta_{\max} - \Delta(x_e)}{\Delta_{\max} - \Delta_{\min}} \right)^q \right]^{\frac{1}{q}} \\ \text{s. t. } V(x) \leq \bar{V} \\ 0 \leq x_{\min} \leq x_e \leq x_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中 α_k ——对应工况下的权重系数

q ——欧氏度量

x_e ——第 e 个单元的相对密度

\bar{V} ——原结构的体积, m^3

C_k ——第 k 个工况的柔度目标函数

$V(x)$ ——要保留的体积, m^3

Δ ——体积分数 F ——力矢量, N

ω ——柔度目标函数的权重系数

Δ_{\min} ——前 3 阶平均频率最小值, Hz

Δ_{\max} ——前 3 阶平均频率最大值, Hz

首先,建立整机拓扑优化模型,用来进行拓扑优化时载荷边界条件处理与 1.2 节静力学分析下所确定的载荷边界条件一致。设置弯扭工况的动载系数为 1.7。同时结合实际工况及优化需要,设置收敛容差为 0.005,即当两次迭代的目标值小于给定容差 0.005 时认为优化求解收敛,结束优化过程。经过 16 步迭代,最终生成了在此目标下的最优车架。

通过 OptiStruct 自带 OSSmooth 模块,将优化后有限元模型转换为 CAD 模型^[19]。综合考虑加工工艺、元器件布置、作业需求等因素,前桥部分除去两侧大部分不受力的无关结构,选用壁厚 10 mm 的纵梁,并在车架前部左右两侧布置简化的加强筋,在优化后模型的基础上设计出最终的车架模型,如图 7 所示。

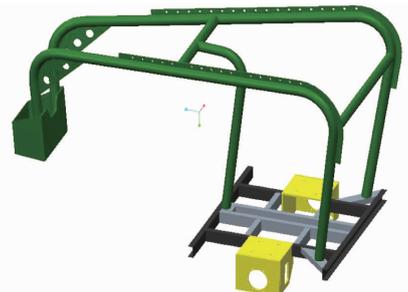


图 7 最终车架模型

Fig.7 Final frame model

对优化后最终模型进行有限元分析,与优化前模型进行对比,优化前车架质量为 829.49 kg,优化

后车架质量为 385.94 kg, 优化后车架质量减少 443.55 kg, 减轻了 53.47%。车架质量减轻的同时, 弯曲刚度、扭转刚度等在优化后未有明显变化。车架前 6 阶固有频率在优化后有所降低, 在田间作业行驶时, 路面由轮胎传至车架的振动主要处于低频段(0 ~ 15 Hz)^[20]。因此不会引起车架共振, 达到了优化目的, 验证了优化的有效性, 如表 4 所示。

表 4 优化前后车架性能参数对比

Tab. 4 Frame performance parameter comparison before and after optimization

参数	原车架	优化后车架
质量/kg	829.49	385.94
弯曲刚度/(N·mm ⁻¹)	2 927	2 854
扭转刚度/(N·m·rad ⁻¹)	3 917	3 762
1 阶固有频率/Hz	27.266	22.30
2 阶固有频率/Hz	52.759	25.81
3 阶固有频率/Hz	57.346	38.32
4 阶固有频率/Hz	77.199	58.54
5 阶固有频率/Hz	84.825	78.72
6 阶固有频率/Hz	110.450	84.33

3 结论

(1) 建立了蔬菜田间动力机械车架的有限元模型, 通过对弯扭工况的静力学分析, 得到车架各位置最大应力为 52.33 MPa, 大部分区域应力不超过 20 MPa, 远低于许用应力, 说明车架在设计时存在较大的强度过剩。

(2) 采集样机在道路行驶、田间开沟作业等工况下的应变时间历程, 进行正态分布检验以及频谱分析, 采用雨流计数法编制载荷谱, 通过疲劳寿命分析, 表明交叉焊缝处作为最危险点的寿命为 7.5×10^4 h, 车架存在较大安全裕量, 有较大优化设计区间。

(3) 基于拓扑优化, 构建了综合多种工况, 以车架应变能和动态低阶固有频率为响应的多目标拓扑优化数学模型, 在满足可靠性的情况下, 对车架进行拓扑优化设计, 优化后的车架质量减少 443.55 kg, 减轻了 53.47%。

参 考 文 献

- 戴艳丽, 赵荣秋, 刘乐承. 我国蔬菜机械研究进展与应用现状[J]. 长江大学学报(自科版), 2018, 15(2): 69-71.
- 肖体琼, 何春霞, 陈巧敏, 等. 基于机械化生产视角的中国蔬菜成本收益分析[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 75-82. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150512&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.012.
- XIAO Tiqiong, HE Chunxia, CHEN Qiaomin, et al. Cost-benefit analysis of vegetable production based on agricultural mechanized production[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 75-82. (in Chinese)
- 肖体琼, 何春霞, 曹光乔, 等. 机械化生产视角下我国蔬菜产业发展现状及国外模式研究[J]. 农业现代化研究, 2015(5): 857-861.
- XIAO Tiqiong, HE Chunxia, CAO Guangqiao, et al. Comparison analysis between China's and foreign vegetable productions with the adoption of mechanization[J]. Research of Agriculture Modernization, 2015(5): 857-861. (in Chinese)
- 朱金光, 冷峻, 丁雄飞, 等. YB3A 型玉米联合收割机底盘机架强度分析方法研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2009(3): 7-11.
- ZHU Jinguang, LENG Jun, DING Xiongfeng, et al. Study on intensity analysis method of model YB3A corn combine chassis machine frame[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2009(3): 7-11. (in Chinese)
- 陈志, 周林, 赵博, 等. 玉米收获机底盘车架疲劳寿命研究[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 19-25.
- CHEN Zhi, ZHOU Lin, ZHAO Bo, et al. Study on fatigue life of frame for corn combine chassis machine[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 19-25. (in Chinese)
- 朱茂桃, 奚润, 李伟. 某轻型汽车后桥壳体疲劳寿命分析[J]. 汽车技术, 2009(1): 34-37.
- ZHU Maotao, XI Run, LI Wei. Fatigue life of light duty vehicle's rear axle housing[J]. Automotive Technology, 2009(1): 34-37. (in Chinese)
- 李强, 高耀东, 王昌. 有限元法及 CAE 技术在现代机械工程中的应用[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(增刊 2): 126-128.
- LI Qiang, GAO Yaodong, WANG Chang. Application of FEM and CAE technology to modern mechanical engineering[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2003, 22(Sup. 2): 126-128. (in Chinese)
- 董学勤, 辛勇, 杨凡. 基于 HyperWorks 的汽车车架有限元建模及刚度分析[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(7): 905-908.
- DONG Xueqin, XIN Yong, YANG Fan. On finite element modeling of a vehicle frame using HyperWorks[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008, 27(7): 905-908. (in Chinese)
- 姚艳春, 宋正河, 杜岳峰, 等. 玉米收获机车架应力及模态数值模拟焊点模型优选[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 50-58.
- YAO Yanchun, SONG Zhenghe, DU Yuefeng, et al. Optimum seeking of spot weld model on numerical simulation of stress and modal analysis for corn combine harvester frame[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 50-58. (in Chinese)
- 陈浩, 吴伟蔚, 刘新田, 等. 轮胎压实对机具牵引阻力的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 52-57.
- CHEN Hao, WU Weiwei, LIU Xintian, et al. Effect of wheel traffic on working resistance of agriculture machinery in field operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 52-57. (in Chinese)
- 邵慧超. 某重型载货汽车车架的疲劳分析及优化[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.

- GAO Huichao. Fatigue analysis and optimization of a heavy truck frame[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- 12 郑俊, 赵红旺, 朵兴茂. 应力应变测试方法综述[J]. 汽车科技, 2009(1): 5-8.
ZHENG Jun, ZHAO Hongwang, DUO Xingmao. Summarization of stress and strain test method[J]. Auto Su-tech, 2009(1): 5-8. (in Chinese)
- 13 刘鸿文. 高等材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- 14 王国军, 蒋美华, 王俊. 载荷谱信号奇异值剔除与降噪处理[C]//全国信息获取与处理学术会议, 2009.
- 15 SUNG I S, CHOON P, KIN K H, et al. Fatigue strength evaluation of aluminum car body of urban transit unit by large scale dynamic load test[J]. JSME International Journal, 2005, 48(1): 27-34.
- 16 李成林, 宋莎莎, 韩振南. 基于 nCode Design - Life 的某车架疲劳可靠性分析[J]. 图学学报, 2014, 35(1): 42-45.
LI Chenglin, SONG Shasha, HAN Zhennan. Fatigue reliability analysis of frame based on nCode Design - Life[J]. Journal of Graphics, 2014, 35(1): 42-45. (in Chinese)
- 17 巢媛. 重型货车车架结构的拓扑优化设计[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
CHAO Yuan. Study on topology optimization technologies of heavy vehicle frame[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007. (in Chinese)
- 18 刘林华, 辛勇, 汪伟. 基于折衷规划的车架结构多目标拓扑优化设计[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(3): 382-385.
LIU Linhua, XIN Yong, WANG Wei. Multi-objective topology optimization for an off-road vehicle frame based on compromise programming[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(3): 382-385. (in Chinese)
- 19 洪清泉, 赵康, 张攀. OptiStruct & HyperStudy 理论基础与工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- 20 董向前, 宋建农, 李永磊. 基于 ANSYS - Workbench 机架振动的模态分析[C]//中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集, 2011.

~~~~~

(上接第 462 页)

- 12 张传斌, 张士领. 1YSG-1 型烟田施肥起垄机的改进与试验[J]. 农机化研究, 2011, 32(6): 119-122.  
ZHANG Chuanbin, ZHANG Tuling. Design of granary intelligent measurement and control termina [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 32(6): 119-122. (in Chinese)
- 13 王宝山, 王淼森, 王万章, 等. 高地隙履带车转向性能试验[J]. 河南农业大学学报, 2017, 51(3): 335-340.  
WANG Baoshan, WANG Miaosen, WANG Wanzhang, et al. Steering performance test of high clearance tracked vehicle [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2017, 51(3): 335-340. (in Chinese)
- 14 王红岩, 王钦龙, 芮强, 等. 高速履带车辆转向过程分析与试验验证[J]. 机械工程学报, 2014, 50(16): 162-172.  
WANG Hongyan, WANG Qinlong, RUI Qiang, et al. Analyzing and testing verification the performance about high-speed tracked vehicles in steering process [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(16): 162-172. (in Chinese)
- 15 程军伟, 高连华, 王红岩, 等. 履带车辆转向分析[J]. 兵工学报, 2007, 28(9): 1110-1115.  
CHENG Junwei, GAO Lianhua, WANG Hongyan, et al. Analysis on the steering of tracked vehicles [J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(9): 1110-1115. (in Chinese)
- 16 曹付义, 周志立, 徐立友. 履带车辆液力机械差速转向系统参数优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 60-66.  
CAO Fuyi, ZHOU Zhili, XU Liyou. Parameter optimization of hydro-mechanic differential turning system for tracked vehicle [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(18): 60-66. (in Chinese)
- 17 荆崇波, 魏超, 李雪原, 等. 履带车辆差速转向机构转向过程动态特性的试验方法[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 62-66.  
JING Chongbo, WEI Chao, LI Xueyuan, et al. Test method of steering dynamic characteristics of differential steering mechanism of tracked vehicle [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 62-66. (in Chinese)
- 18 芮强, 王红岩, 王钦龙, 等. 履带车辆转向性能参数分析与试验研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(12): 127-136.  
RUI Qiang, WANG Hongyan, WANG Qinlong, et al. Research on the acquisition of steering performance parameters of armored vehicle based on experiments [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(12): 127-136. (in Chinese)
- 19 焦瀛. 高性能微处理器基本功能部件的设计与测试[D]. 西安: 西安理工大学, 2012.  
JIAO Ying. Design and testing of basic functional components of high performance microprocessors [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012. (in Chinese)
- 20 丁力, 宋志平, 徐萌萌, 等. 基于 STM32 的嵌入式测控系统设计[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(增刊 1): 260-265.  
DING Li, SONG Zhiping, XU Mengmeng, et al. Design of embedded measurement and control system based on STM32 [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(Supp. 1): 260-265. (in Chinese)
- 21 张传斌, 余泳昌, 吴亚萍. 高通过性四轮自走式烟草田间作业机的设计[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 37-41.  
ZHANG Chuanbin, YU Yongchang, WU Yaping, et al. Design of high traffic ability four wheel self-propelled field machine for tobacco [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 37-41. (in Chinese)